ChinaXiv合作期刊

地形影响下祁连山北麓不同类型降水特征对比分析

付双喜[1]， 张洪芬[2]， 杨丽杰[2]， 赵玉娟[2]， 张可心[2]， 陈 祺[1]

（1. 甘肃省人工影响天气办公室，甘肃 兰州 730000；2. 庆阳市气象局，甘肃 庆阳 745000）

摘 要：利用张掖CINRAD/CC多普勒雷达资料，结合气象观测资料及L波段探空秒数据，分析祁连山北麓不同类型强降水过程中地形的影响效应，结果表明：不同类型强降水的形成机制及物理量条件各有差异，地形对降水的影响效应也各不相同；各类型降水的大值区集中在山区或山地北坡，地形升高造成的强迫抬升效应显著；局地小地形的阻挡、辐合和抬升作用在强对流性降水过程中较为突出；大地形整体抬升形成的列车效应及局地小地形的汇集作用共同造成了短时强降水型过程；而系统性冷空气影响降水过程中，地形作用的主要表现形式是承载层气流在"口袋"状地形影响下，强回波不断生成并长时间维持；探空数据上，高层冷云降水与低层暖云降水的表征项变化各不相同。

关键词：祁连山北麓；强降水特征；地形影响；雷达回波；探空秒数据

chinaXiv:202109.00052v1

地形对降水有很大的影响，其对局部天气系统，甚至全球大气环流产生重要影响，主要有动力、热力、云物理作用，国内外对地形影响降水的研究已有多半个世纪的历史，Hobbs等[1]研究了华盛顿州锋面系统路过山地时云与降水的特征，发现淞附和聚并是粒子增长的普遍途径；Woods等[2]发现锋面系统与地形影响共同作用于云系的微物理结构，在迎风坡地形对低层气流的抬升增加了云水含量；20世纪60年代国内科学家研究山地对大气和大气运动的作用，开展了大量的山坡局地环流、山区边界层结构等的观测研究，诸多学者详细研究了不同地区地形对降水的影响机制[3-7]，主要集中在青藏高原、落基山脉、祁连山、天山、太行山脉以及南方山丘等，通过研究发现不同山脉对大气运动产生的动力作用和热力效应不同，动力作用分为动力阻挡和摩擦作用等[8]，热力作用通过潜热释放的作用可以使中、高层增温和高层辐散加强[9]，从而有利于地形垂直环流向上伸展和加强，形成正反馈，最终导致地形对降水的强烈增幅，云物理作用通过影响云中液态水分布的变化及降水粒子的增长方式等影响降水[10]，大量已有研究为我国地形降水研究打下良好基础。

祁连山位于中国青海省东北部与甘肃省西部边境，由多条西北-东南走向的平行山脉和宽谷组成，海拔4000~6000 m，面积约2062 km^2，共有冰川3306条，其高山积雪对中国大陆的云水资源存储有着至关作用，其地形结构、云特征与降水关系密切，被越来越多的国内研究学者所重视[11-14]，祁连山地区的降水是河西走廊及其下游重要的水源，而祁连山地形云降水在该地区总降水中占很高的比例，因此，研究祁连山北麓不同类型降水特征，对该地区实施人工影响天气作业具有科学指导意义。

甘肃省张掖市位于祁连山北麓，北部有合黎山、龙首山组成的走廊北山，中部为海拔230~1410 m的倾斜平原，形成张掖盆地，平原地形呈冲积扇形，由东南向西北敞开，是河西走廊的重要组成部分；张掖市特殊的喇叭口地形，有利于气流上升运动，使降水加大，喇叭口地形的辐合区容易出现暴雨中心。而利用多普勒雷达资料[15-20]和探空数据[21]可以更好的分析地形对降水的影响，更深入的探索地形对祁连山北麓不同类型降水影响效应。本文利用张掖CINRAD/CC多普勒雷达资料、MICAPS数

收稿日期：2021-01-21； **修订日期**：2021-06-20
基金项目：国家重点研发计划（2019YFC1510302，2016YFC0401000），西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目（ZQC-R18208），中国气象局创新发展专项（CXFZ2021Z036）
作者简介：付双喜（1973-），男，甘肃宁县人，高级工程师，主要从事人工影响天气和雷达资料分析应用研究. E-mail: fusx1997@163.com
通讯作者：张洪芬. E-mail: 45101400@qq.com

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202109.00052v1

据及探空秒数据等资料,分别对张掖2017年8月8—9日强对流性降水、2018年8月31日—9月1日短时强降水、2019年6月25—26日系统性强降水中3次不同类型的强降水过程进行对比分析,归纳出祁连山北麓不同类型降水过程中地形对强降水的影响特征,以揭示祁连山典型地形云系的宏观结构特征和降水形成机制,为祁连山地形云人工催化作业概念模型的建立及预报准确率的提高奠定基础。

1 数据来源

雷达数据来源于张掖市CINRAD/CC的C波段全相干脉冲多普勒雷达数据,采用VOL体扫14层的VCP11模式;强度场R、速度场V产品采用敏视达RPG/PUP产品;逐小时降水资料来源于张掖市区域站观测数据;形势场资料来源于MICAPS历史数据;探空秒数据来源于张掖市L波段探空观测数据。

2 天气形势及实况

2.1 天气实况

2017年8月8—9日,张掖市出现了雷雨、大风、强降水、冰雹等强对流天气过程,最大累积降水量31.5 mm,最大雨强18.2 mm·h^{-1},最大冰雹直径3 mm,极大风速23.8 m·s^{-1};2018年8月31日—9月1日出现了1974年以来最强降水过程,36站累积降水量超过30 mm,8站超过50 mm,21站次出现短时强降水,最大累积降水量70.4 mm、最大雨强28.4 mm·h^{-1};2019年6月25—26日张掖市出现区域性暴雨过程,4站累积降水量超过50 mm,3站次短时强降水,最大累积降水量为62 mm,最大雨强11 mm·h^{-1}。3次暴雨洪涝诱发山洪,造成乡镇房屋倒塌、道路受损、农田淹没、城乡积劳严重;尤其是2018年8月31日—9月1日暴雨过程直接造成经济损失8612.5×10^{4}元。

通过降水空间分布与张掖市地形对比分析可以看出(图1),3次降水过程的大值区均出现在山区或山地北坡:2017年8月8—9日降水大值区出现在肃南、民乐、张掖市交界处,位于河西走廊南山北部的临松山北部;2018年8月31日—9月1日降水大值区出现在肃南北部山脉的西部及北部、临松山附近及山丹娘娘山附近;2019年6月25—26日降水大值区出现在山丹、民乐东部祁连山北部附近,地势起伏极大。由此可见张掖地形对降水的分布影响显著。

2.2 500 hPa环流形势分析

如图2所示,2017年8月8—9日降水过程是"西

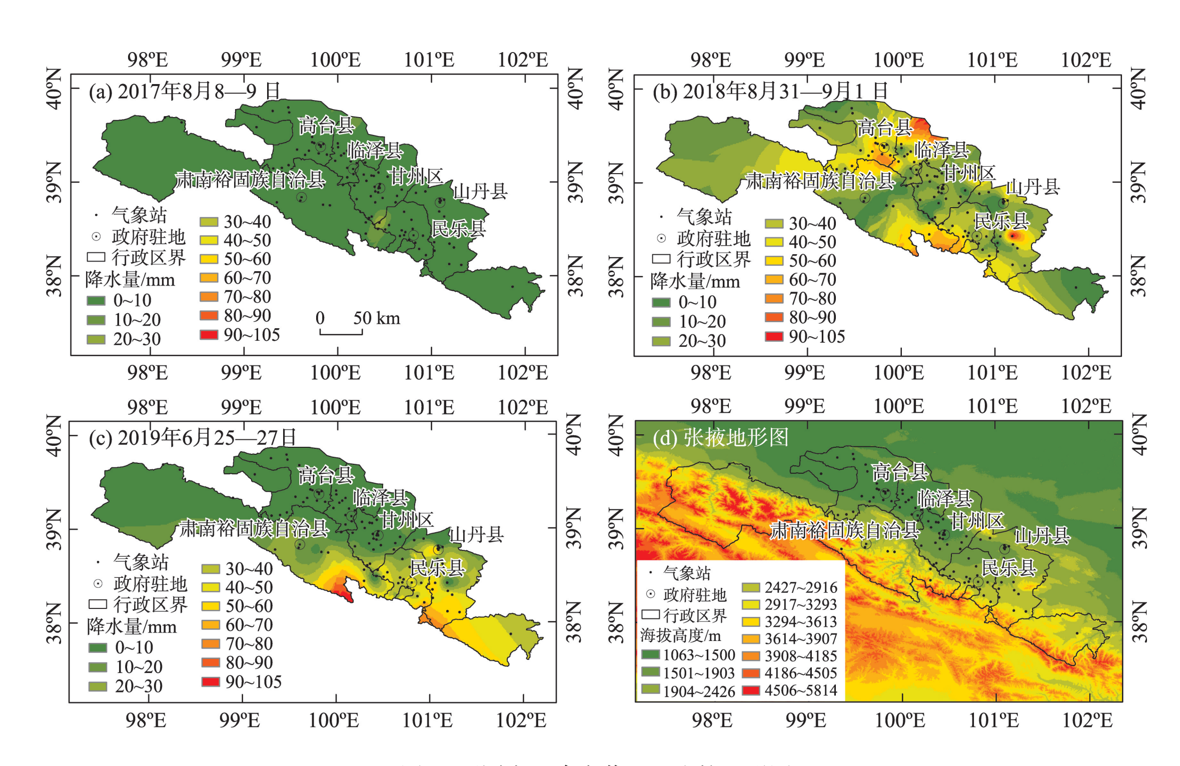


图1 不同类型降水落区和张掖地形图

Fig. 1 Different types of precipitation areas and Zhangye topographic map

ChinaXiv合作期刊

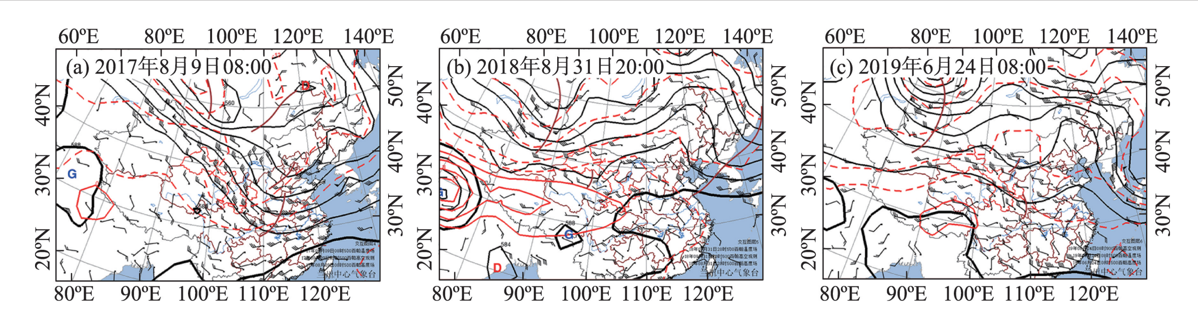


图2 不同类型降水500 hPa形势场

Fig. 2 500 hPa situation field of different types of precipitation

北气流型”降水，冷空气东移南压，在民乐、张掖、肃南交界处受地形阻挡、地面强迫抬升，造成了局地强对流天气；2018年8月31日—9月1日降水过程是“东高西低型”暴雨，新疆中部有一低槽，副高外围584 dagpm等高线在张掖西部形成高原槽，南北槽同位相叠加，使得副高西北侧暖湿气流与新疆东移冷空气在河西走廊中部交绥，对其产生主要影响；2019年6月25—27日降水过程是“低槽东移型”降水，500 hPa张掖上空受偏西北气流控制，新疆东北部为一冷涡，其前部不断分裂冷空气南下，配合低层暖湿气流，造成此次持续性降水过程。降水系统的差异，造成了冷暖空气及干湿气流的移动方向不同，从而地形对强降水的影响也有所不同。

2.3 中尺度环境场配置对比

从3次降水的中尺度环境场配置对比可以看出（表1），3次强降水均发生在有利的环流背景下，但物理量条件各有差异：2017年8月8日过程冷空气更强，高、低层温度差更加明显，水汽条件相比较弱；2018年8月31日降水过程，更明确的表现出了“副高外围型”降水的特点，水汽、能量条件较好；2019年6月26日降水过程，各项条件均相对较弱，主要是在冷空气的一次次东移过程中造成的降水量累加。

3 雷达资料分析

受祁连山复杂地形的影响，主要选取低仰角VPPI（2.4°）的雷达回波强度、径向速度资料（图中未注明的仰角均为2.4°、距离圈均为30 km）对3次不同类型的降水过程进行分析讨论。

3.1 强度场分析

3.1.1 2017年8月8—9日降水 如图3所示，2017年8月8日13:00—16:00，雷达测站100 km范围内出现自西北向东南移动的块状对流回波。回波前后两次在民乐南固站附近增强，第一次增强时段为13:19—14:05，回波迅速增强至57 dBz，与之对应的13:40—13:50十分钟降水量为9.9 mm，属甘肃河西地区罕见现象；第二次增强时段为14:34—15:08，14:51回波发展到最强，达59 dBz，并表现出弓状回波结构。14:57—15:48，高台新坝站附近再次有小块积云回波自西北方向移入，对流云迅速发展，范围扩大、强度增强，回波强度达56 dBz，强回波维持了两个体扫（15:25—15:31），强回波出现的时间与冰雹出现的时间基本一致。

强降水和冰雹的落区还与当地的特殊地形有密切关系：高台新坝地处祁连北麓北偏西开口向南凹陷处，具有地形阻挡和对水汽能量的强制辐合和抬升作用，将对流不稳定能量抬升到凝结高度以上，为对流的产生提供了较好的触发机制。民乐南固站位于山脚下，从新疆下滑的西北风翻过其西北侧的山脉，在地形的背风坡有利于对流的发展，且地形的辐合作用同样也较为明显，有利于风向产生辐合。

3.1.2 2018年8月31—9月1日降水 在冷空气进入张掖后，受到祁连山北部山脚地形及梧桐泉附近南北向丘陵的地形阻挡抬升，造成局地强降水的产生，呈现出层状-积云混合降水云系的特征，其最大回波强度维持在35~45 dBz（图4）。回波东移遇到祁连山、龙首山、合黎山等地形抬升时增强；18:00强回波在向北移动过程中在高台、临泽境内持续维持对流性特征，之后达到本次暴雨过程的成熟阶段，测站西部的强回波合并发展后向东北偏北方向移动，范围逐渐扩大，在以高台县南部为中心的强降雨区，具有明显的“列车效应”，且18:00—22:00积云降水回波主体覆盖以雷达测站为中心的90 km范

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

表1　3次降水过程中尺度环境场配置特征

Tab. 1　Characteristics of mesoscale environmental field configuration in three precipitation processes

时间	形势场				物理量场			
	200 hPa急流	500 hPa	700 hPa	地面	K指数/℃	700 hPa比湿/(g·kg^{-1})	θse_{700hPa}/℃	$T_{700-500}$/℃
2017-08-08 T8:00	出口区左侧	冷槽	暖脊	辐合线	22-24	6-7	58-60	≥22
2018-08-31 T8:00	无	低涡	切变	锋生	≥32	≥12	70-76	≥18
2019-06-26 T8:00	入口区右侧	槽	切变	露点锋	18-24	6-8	56-64	≥20

注:θse_{700hPa}表示700 hPa假相当位温;$T_{700-500}$表示700 hPa与500 hPa温度差。

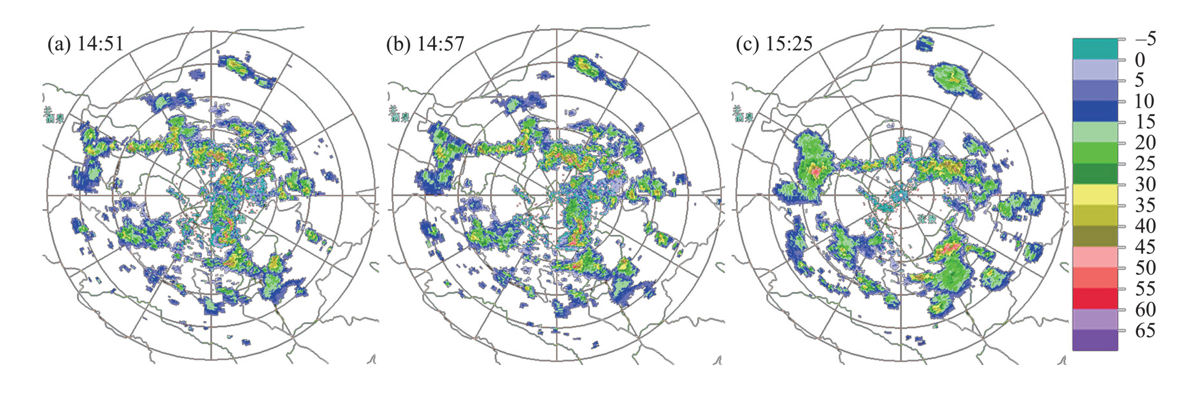


图3　2017年8月8日不同时间雷达反射率因子(dBz)分布

Fig. 3　Radar reflectivity factor (dBz) at different time on August 8, 2017

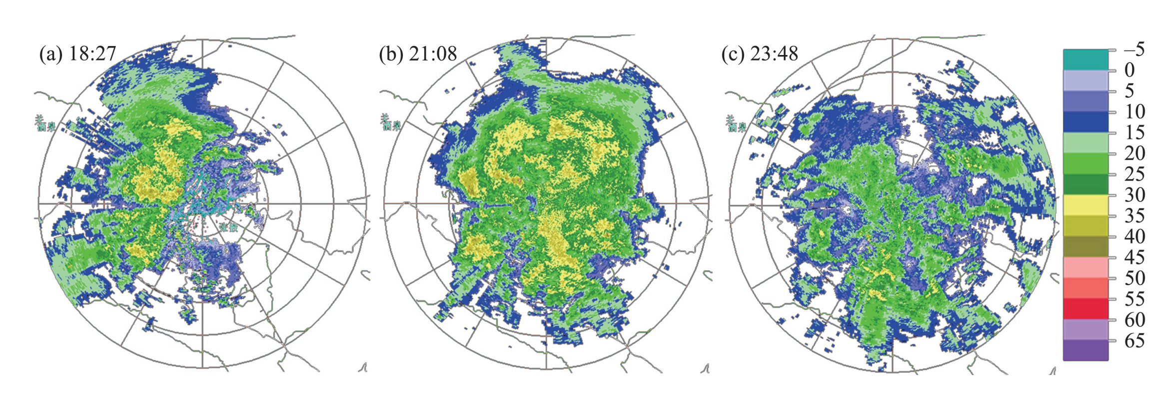


图4　2018年8月31日不同时间雷达反射率因子(dBz)分布

Fig. 4　Radar reflectivity factor (dBz) at different time on August 31, 2018

围,22:00后强回波东移,降水随之减弱。

3.1.3　2019年6月25—26日降水　按回波发展降水过程可以分为3个阶段(图5),第一阶段,25日08:00—12:00,降水主要是冷锋底部及高空西风槽前的冷空气在东移的过程中,遇到龙首山地形的抬升而形成的低云降水,降水以层状云回波为主集中在低仰角(0.5°~1.5°),自西北向东南方向移动。前期(08:57)0.5°仰角上山丹东南部的回波最强达到53 dBz,1.5°仰角上回波为30 dBz,高仰角上回波已东移,表现出明显的低质心结构,有利于高效率的对流降水,山丹东南部降水增幅明显。第二阶段,25日13:34,2.4°仰角上测站西南部出现许多分散的对流块向东北方向移动,在祁连山的阻挡和抬升作用下,逐渐增强并向东北方向移动,强度>35 dBz的回波位于山丹、民乐南部,与之对应该地降水明显增强。第三阶段,25日21:29以后,民乐、山丹附近的回波明显开始增强、发展,强降水区也表现出了低质心的结构。

此次降水过程中以层状云降水为主,伴随冷空气分裂南下,回波不断东移,在遇到祁连山、龙首山等地形抬升时增强转为积层混合降水回波,在承载层气流和“口袋”状地形(西北高、东南低,三面环

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

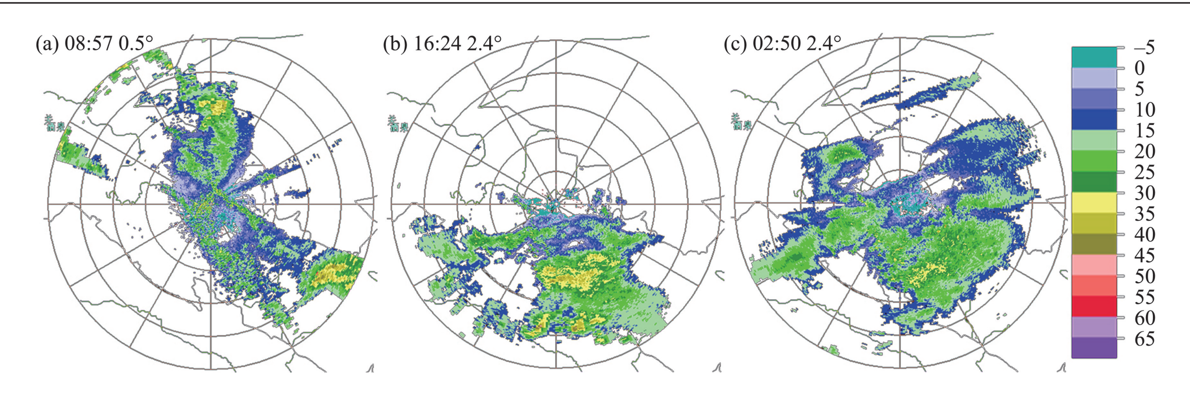


图5 2019年6月25—26日0.5°和2.4°仰角上不同时间雷达反射率因子(dBz)分布

Fig. 5 Radar reflectivity factor (dBz) at different time at 0.5° and 2.4° elevation during 25 to 26 June 2019

山)影响下,使得强回波不断通过测站东南部并在该地长时间维持。强降水时段反射率因子的垂直结构表现出了"低质心"结构,有利于降水。尤其是焉支山西北部的山丹陈户,冷空气过境时爬坡造成的能量抬升,增强了降水强度。

3.2 速度场分析

3.2.1 2017年8月8—9日降水 如图6所示,13:25—13:54民乐南固附近(最强降水区)风场呈辐合、降水增强,14:05辐合中心向东南方向移去并减弱;14:51民乐南固再次出现风场辐合中心,持续了两个体扫(14:51—15:03),与民乐南固再次出现强降水的时间相对应,15:03辐合中心向东南方向移去,降水减弱。

3.2.2 2018年8月31日—9月1日降水 从多普勒雷达径向速度分析(图7),降水过程前期为暖区降水,18:36开始零速度线为反"S"型,低层有冷平流,中高层为偏南风,说明冷空气从低层入侵,然后逐渐渗透到高层,因此雷达站上方中层风向也由偏南风慢慢转为西北风,20:10开始从高台、临泽西南方向到张掖出现明显的速度辐合,且正负速度中心值明显增大,至21:47达到最大,负速度中心值为 $-15.0\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,正速度中心值为 $12.1\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,说明这支西北风低空急流加强,且速度辐合也加强,是高台境内多地出现短时强降水的一个主要原因,至22:45雷达站上空整层都转为西北风,冷空气已完全过境。

3.2.3 2019年6月25—26日降水 如图8所示,第一阶段,逆风区结构出现在14:24,与强度场相对应,雷达站西南部出现了3个呈东北-西南走向的负速度区,逆风区位于肃南附近被负速度包围并有零线分隔,水平尺度5~6 km。第二阶段,15:24肃南与民乐附近速度场上速度零线呈"弓"形结构,径向入流位于"弓"内构成了辐合流场,这种结构维持至18:27。第三阶段,21:29开始,测站东南部山丹、民乐附近再次转为辐合流场,26日02:56—03:46在负速度区中镶嵌着若干个被零线包围的逆风区,辐合流场及逆风区结构的时间维持较长,是该地出现暴雨的主要原因。

从雷达分析中可以看出,地形在不同类型降水过程中的作用各不相同,强对流性降水,冷空气在

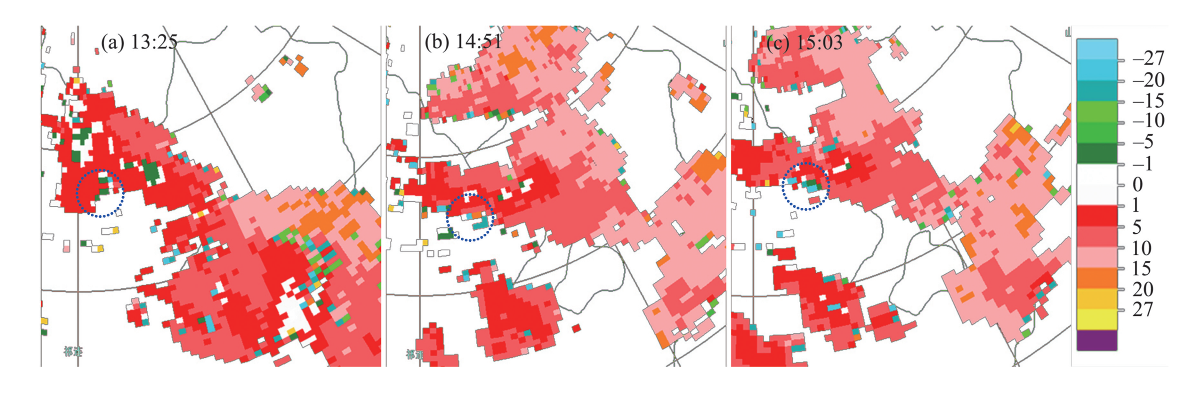


图6 2017年8月8日不同时间多普勒雷达径向速度($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)分布

Fig. 6 Radial velocity of Doppler radar ($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$) at different time on August 8, 2017

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

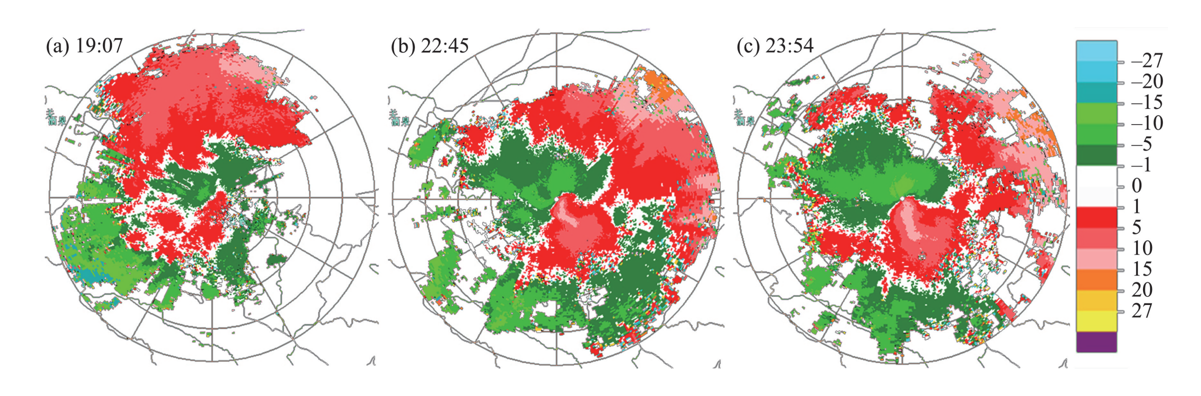


图7 2018年8月31日不同时间多普勒雷达径向速度(m·s^{-1})分布

Fig. 7 Radial velocity of Doppler radar at different time on August 31, 2018 (m·s^{-1})

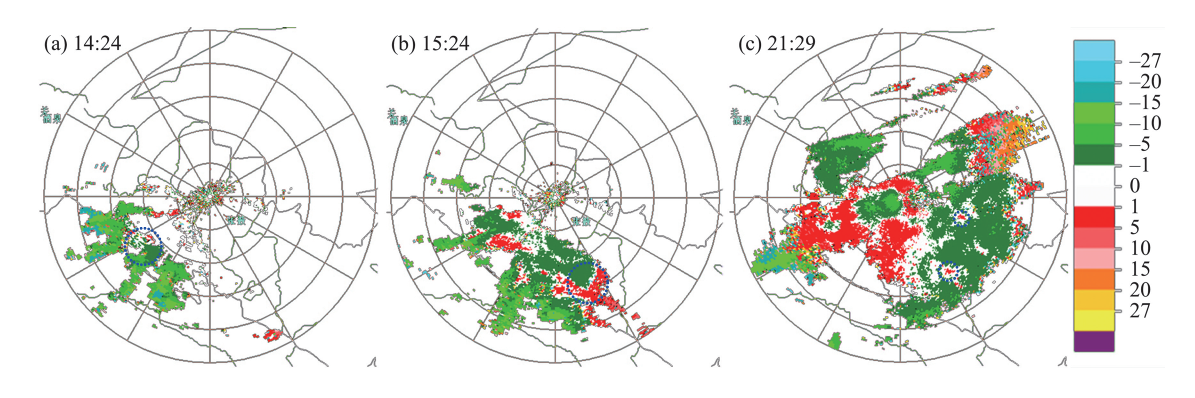


图8 2019年6月25日不同时间多普勒雷达径向速度(m·s^{-1})分布

Fig. 8 Radial velocity of Doppler radar at different times from 25 June 2019

东移南压中,主要以小地形的强迫作用为主,一是对不稳定能量的强迫抬升,二是冷空气翻山造成的绕流辐合强迫抬升作用,从而造成了局地强降水;在短时强降水过程中,主要以大地形的阻挡抬升作用形成的列车效应为主,小地形的强迫抬升也起着非常重要的作用,从而形成了整体降水强度大,伴有短时强降水的降水形式;系统性冷空气过程主要是大地形对冷空气的抬升作用,承载层气流和"口袋"状地形(西北高、东南低,三面环山)影响下,表现为冷空气的爬坡效应的"低质心"结构。

4 探空数据分析

4.1 云层特征分析

如表2所示,2017年7月8—9日降水过程(过程1,下同)前期云层较薄,云高较高,云中含水形式以冰晶-汽混合为主,起始温度较低,以中云开始;2018年8月31—9月1日降水过程(过程2,下同)云层较厚,云底较低,伸展高度较高,起始温度较高,云中含水形式以水汽为主,以中低云为主;2019年6月25—26日持续降水过程(过程3,下同)前,云层厚度、云底高度中等比过程1低,较过程2高,云中起始温度位于前两次过程之间,云厚度中等以中云为主。而在降水过程中,过程1是云底迅速降低,云底温度升高明显,云顶高度也迅速降低,云厚度略有增加,云型以中云为主;过程2随着降水的开始,云底逐渐升高,云底温度也迅速降低,云顶降低,云顶温度升高明显,云层厚度迅速减小,云型以中低云为主;过程3云底起始高度抬高,但抬高幅度较过程1小,云底温度先迅速降低又略有升高,云顶高度升高,云顶温度降低,云厚度增加,以中高云为主。在降水结束后,过程1迅速减弱至无云形式,过程2云层厚度减弱,云底温度增加,云顶温度迅速降低,云顶高度抬升,以较高的中云为主;过程3变化与降水过程中的相比不显著。

4.2 特殊高度层

如表3所示,过程1降水前后,0 ℃层高度逐渐升高,相对湿度先增加再减小,-20 ℃层高度逐渐抬升,湿度下降,0 ℃层与-20 ℃层高度差逐渐减小,风

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

表2 3次降水过程云层特征统计

Tab. 2 Cloud characteristics of three precipitation processes

时间		起始层			结束层			云层厚度/gpm
		P/hPa	*T*/℃	*H*/gpm	*P*/hPa	*T*/℃	*H*/gpm	
2017-07-08—09	07-07 T23:00	493.8	-12.5	5912	472.7	-14.8	6223	311
	07-08 T11:00	577.3	-2.2	4724	507.1	-8.6	5725	1001
	07-08 T23:00	574.8	-2.8	4751	527.4	-8.1	5418	667
2018-08-31—09-01	08-31 T11:00	848.1	20.5	1462	347.5	-17.2	8701	7241
	08-31 T23:00	853.4	16.4	1462	527	-0.4	5428	3966
	09-01 T11:00	591.6	0	4495	519.7	-3.1	5528	1083
	09-01 T23:00	636.9	2.3	3906	558.9	-17	4935	1047
2019-06-25—26	06-25 T11:00	753.8	12.9	2479	535.5	-2.6	5264	2785
	06-25 T23:00	626	1.1	3997	410.5	-13.8	7317	3320
	06-26 T11:00	666.5	3.3	3476	366.7	-19	8180	4704
	06-26 T23:00	658.7	0.9	3573	346.4	-22.9	8538	4965

注：*P*表示气压；*T*表示温度；*H*表示位势高度。

表3 3次降水过程特殊高度层特征统计

Tab. 3 Characteristics of special altitude layer in three precipitation processes

时间		$H_{0℃}$/gpm	$P_{0℃}$/hPa	$RH_{0℃}$/%	0℃风向	$V_{0℃}$/(m·s^{-1})	$H_{-20℃}$/gpm	$P_{-20℃}$/hPa	$RH_{-20℃}$/%	-20℃风向	$V_{-20℃}$/(m·s^{-1})	*H*/gpm	风切变/s
2017-07-08—09	07-07 T23:00	4295	607	64	299	17	7470	400.9	18	295	18	3175	0.1
	07-08 T11:00	4391	599.6	77	319	17	7487	401	25	295	18	3096	0.11
	07-08 T23:00	4417	598.7	80	306	14	7695	390	7	349	14	3278	0
2018-08-31—09-01	08-31 T11:00	5573	518.3	91	186	8	9073	329.5	83	300	12	3500	0.83
	08-31 T23:00	4676	581.3	92	300	19	8938	332.8	8	250	19	4262	1.15
	09-01 T11:00	4495	591.6	92	297	4	8823	340.1	86	255.3	30	4328	2.99
	09-01 T23:00	4605	583.5	92	249	8	8748	340.6	12	270	24	4143	1.71
2019-06-25—26	06-25 T11:00	4591	582.3	93	40	3	8347	358.9	80	266	23	3756	3.41
	06-25 T23:00	4362	598.5	90	53	4	8476	3515	74	258	24	4114	2.7
	06-26 T23:00	4149	613.2	91	119	2	8200	352	87	266	22	4051	3.52
	06-26 T23:00	3573	658.7	91	282	7	8181	363.2	85	242	24	4608	1.49

注：$H_{0℃}$、$P_{0℃}$、$RH_{0℃}$、$V_{0℃}$和$H_{-20℃}$、$P_{-20℃}$、$RH_{-20℃}$、$V_{-20℃}$分别指0 ℃、-20 ℃的位势高度、气压、相对湿度、速度。

切变先增加后减小；过程2降水前后，0 ℃层高度先降低后升高，湿度均比较大，-20 ℃层逐渐降低，湿度是先降低再升高，0 ℃层与-20 ℃层高度差先增加再减小，风切变先增加再减小；过程3降水前后，0 ℃层高度逐渐降低高度差先升高再降低，风切变先减小再增大再次减小。

对云层特征和特殊高度层特征分析发现，2017年7月8—9日西北气流型强对流过程高层冷云特征明显，各表征项变化急剧；2018年8月31—9月1日降水过程低层暖云特征明显，各表征项变化平缓；2019年6月25—26日降水过程介于二者之间，具有明显冷空气持续影响特征。

5 结 论

（1）3次降水的大值区均出现在山区或山地北坡，受地形影响明显，地形的强迫抬升效应显著，而地形对降水影响的强弱程度与降水类型有关。

（2）3次强降水过程降水机制各不相同，2017年8月8—9日降水过程是“高空冷槽型”降水，冷空气东移造成的局地强对流天气；2018年8月31日—9月1日降水过程是冷空气和副高外围共同影响的

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

典型“东高西低型”暴雨形势;2019年6月25—27日降水过程是中空冷空气不断分裂东移,配合低层暖湿气流共同造成的“低槽东移型”持续降水过程。

(3) 强对流性降水过程,地形对强降水的作用主要是局地小地形的阻挡、辐合和抬升作用;短时强降水型降水过程是大地形造成的整体抬升形成的列车效应,以及局地小地形的汇集作用下共同造成;系统性冷空气过程是大地形的抬升作用,承载层气流和“口袋”状地形(西北高、东南低,三面环山)影响下,强回波不断生成并长时间维持,主要表现为冷空气爬坡效应的“低质心”结构。

(4) 在探空秒数据上,2017年7月8—9日强对流过程高层冷云特征明显,各表征项变化急剧;2018年8月31日—9月1日降水过程低层暖云特征明显,各表征项变化平缓;2019年6月25—26日降水过程介于二者之间,具有明显冷空气持续影响特征。

参考文献(References):

[1] Hobbs, Peter V. The nature of winter clouds and precipitation in the cascade mountains and their modification by artificial seeding. part Ⅰ: Natural conditions[J]. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14(2): 783-804.

[2] Woods C P, Stoelinga M T, Locatelli J D, et al. Microphysical processes and synergistic interaction between frontal and orographic forcing of precipitation during the 13 December 2001 IMPROVE-2 event over the oregon cascades[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(3): 3493-3519.

[3] 王成鑫, 高守亭, 冉令坤, 等. 四川地形扰动对降水分布影响[J]. 应用气象学报, 2019, 30(5): 586-597. [Wang Chengxin, Gao Shouting, Ran Lingkun, et al. Effects of topographic perturbation on the precipitation distribution in Sichuan[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(5): 586-597.]

[4] 徐靖宇, 兰明才, 周长青. 南岭地形对湘南降水的影响分析[J]. 地理科学研究, 2018, 7(3): 258-263. [Xu Jingyu, Lan Mingcai, Zhou Changqing. Analysis of the influence of Nanling topography on precipitation in South Hunan[J]. Geographical Science Research, 2018, 7(3): 258-263.]

[5] 钟水新. 地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1122-1132. [Zhong Shuixin. Research progress on the influence mechanism and prediction method of topography on precipitation[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 1122-1132.]

[6] 付超, 谌芸, 单九生. 地形因子对降水的影响研究综述[J]. 气象与减灾研究, 2017, 40(4): 318-324. [Fu Chao, Chen Yun, Shan Jiusheng. A review of the effects of terrain factors on precipitation [J]. Research of Meteorology and Disaster Reduction, 2017, 40(4): 318-324.]

[7] 王凌梓, 苗峻峰, 韩芙蓉. 近10年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 64-75. [Wang Lingzi, Miao Junfeng, Han Furong. Research progress on the influence of topography on precipitation in China in recent 10 years[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 64-75.]

[8] 胡伯威. 中尺度地形对大气铅直运动和强降水的影响[J]. 暴雨灾害, 2000, 19(1): 8-23. [Hu Bowei. The mesoscale orographic influence on intense precipitation[J]. Torrential Rain and Disasters, 2000, 19(1): 8-23.]

[9] 高坤, 翟国庆, 俞樟孝, 等. 华东中尺度地形对浙北暴雨影响的模拟研究[J]. 气象学报, 1994, 52(2): 157-164. [Gao Kun, Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, et al. The simulation study of the mesocsale orographic effects on heavy rain in east China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(2): 157-164.]

[10] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 309-316. [Liao Fei, Hong Yanchao, Zheng Guoguang. Overview of the research on the influence of topography on precipitation[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35 (3): 309-316.]

[11] 刘晓迪, 宋孝玉, 覃琳, 等. 祁连山北麓牧区植被生长季不同等级降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 31-39. [Liu Xiaodi, Song Xiaoyu, Tan Lin, et al. Spatio-temporal variations of different grade precipitation in the pastoral area on the northern slope of Qilian Mountains during vegetation growing season[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4): 31-39.]

[12] 张百娟, 李宗省, 王昱, 等. 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5272-5285. [Zhang Baijuan, Li Zongsheng, Wang Yu, et al. Characteristics of stable isotopes and analysis of water vapor sources of precipitation at the northern slope of the Qilian Mountains[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5272-5285.]

[13] 李岩瑛, 张强, 许霞, 等. 祁连山及周边地区降水与地形的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 30(1): 52-61. [Li Yanying, Zhang Qiang, Xu Xia, et al. Relationship between precipitation and terrain over the Qilian Mountains and Their Ambient Areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 30(1) : 52-61.]

[14] 陈乾, 陈添宇, 肖宏斌. 祁连山区夏季降水过程天气分析[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 26-31. [Chen Qian, Chen Tianyu, Xiao Hongbin. Synoptic analysis of summer precipitation over Qilian Mountains [J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1): 26-31.]

[15] 刘平, 刘九玲. 新一代天气雷达在濮阳特大暴雨过程中的应用[J]. 气象与环境科学, 2006, 29(3): 39-40. [Li Ping, Liu Jiuling. Application of a new generation weather radar in the process of heavy rainstorm in Puyang[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2006, 29(3): 39-40.]

chinaXiv:202109.00052v1

ChinaXiv合作期刊

[16] 陈鲍发, 魏鸣, 柳守煜. 逆风区的回波演变与强对流天气的结构分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 33−40. [Chen Baofa, Wei Ming, Liu Shouyu. The echo evolution of adverse wind area and the structure of the strong convection weather[J]. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(2): 33−40.]

[17] 蔡晓云, 焦热光, 卞素芬, 等. 多普勒速度图暴雨判据和短时预报工具研究[J]. 气象, 2007, 27(7): 13−15. [Cai Xiaoyun, Jiao Reguang, Bian Sufeng, et al. A study of heavy rain criterion and short-time forecasting tool based on Doppler velocity map[J]. Meteorological Monthly, 2007, 27(7): 13−15.]

[18] 付双喜, 张鸿发, 楚荣忠. 河西走廊中部一次强降水过程的多普勒雷达资料分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(5): 656−663. [Fu Shuangxi, Zhang Hongfa, Chu Rongzhong. Aanalzing on a heavy precipitation with Doppler radar data in the middle of Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2009, 26(5): 656−663.]

[19] 李照荣, 张强, 陈添宇, 等. 一次强冰雹暴雨天气过程闪电特征分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(3): 321−321. [Li Zhaorong, Zhang Qiang, Chen Tianyu, et al. Analysis on lightning characteristics of a hail-rainstorm weather[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(3): 322−327.]

[20] 付双喜, 王致君, 张杰, 等. 甘肃中部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 932−941. [Fu Shuangxi, Wang Zhijun, Zhang Jie, et al. Analysis of echo character of doppler radar for a severe convection in the mid-part of Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 932−941.]

[21] 蔡淼, 欧建军, 周毓荃, 等. L波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 213−222. [Cai Miao, Ou Jianjun, Zhou Yuquan, et al. Discriminating cloud area by using L-band sounding data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(2): 213−222.]

Comparative analysis of different types of precipitation characteristics in the northern foot of Qilian Mountain under the influence of topography

FU Shuangxi[1], ZHANG Hongfen[2], YANG Lijie[2], ZHAO Yujuan[2], ZHANG Kexin[2], CHEN Qi[1]

(1. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Qingyang Meteorological Bureau, Qingyang 745000, Gansu, China)

Abstract: The effects of precipitation on Qilian Mountain and the process of heavy rain in different terrains were evaluated using data from the Zhangye CINRAD/CC Doppler radar, conventional meteorological observation, and L-band second radiosonde. The different types of heavy rain formation mechanisms and physical conditions depend on the effect of terrain on the precipitation. The large value area for every type of precipitation is concentrated in the mountainous area or the northern slope of the mountain. The forced uplift effect caused by terrain elevation was significant. The blocking, convergence, and uplift of minor local terrains are more prominent in the process of strong convective precipitation. The training effect produced by the overall uplift due to the significant topography and the convergence effect caused by the small local topography resulted in a short-time heavy precipitation process. In systematic cold air affecting precipitation, the main topographic action form is the strong airflow echo in the bearing layer, which is continuously generating and is being maintained for a long time under the influence of a “pocket” topographic shape. The representational terms of upper-level cold cloud precipitation and lower-level warm cloud precipitation differed in the radiosonde data.

Keywords: the northern foot of Qilian Mountains; heavy precipitation; terrain influence; radar echo; sounding second level data

chinaXiv:202109.00052v1